

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.015

刘家宏,邵薇薇,王浩,等.水资源利用效率频谱分析方法及应用[J].水利水运工程学报,2019(6):132-138.(LIU Jiahong, SHAO Weiwei, WANG Hao, et al. Spectrum analysis method for assessing water use efficiency[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 132-138. (in Chinese))

水资源利用效率频谱分析方法及应用

刘家宏¹,邵薇薇¹,王 浩¹,李元菲²,李维佳³

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038; 2. 辽宁师范大学 地理科学学院,辽宁 大连 116029; 3. 大连理工大学 水利工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:水资源高效利用是缺水地区缓解水资源供需矛盾的关键措施之一,评价一个国家或地区的水资源利用效率,是水资源管理需要解决的基础科学问题。现有的水资源利用效率评价指标主要有万元GDP用水量、农业灌溉水利用系数等,这些指标表征了一个国家或地区的综合用水水平,不能反映区域内部用水效率的不均衡性,也无法表达不同用水效率水平所支撑的经济体量,因此不能识别低效用水对象,难以对低效用水对象进行精准调控。水资源利用效率频谱分析方法基于伽玛函数解析了不同用水效率及其对应的经济规模,进而计算不同用水效率对应的经济体量占经济总量的比例(类似于概率密度),绘制水资源利用效率频谱图。基于1998—2016年的我国分省区万元GDP用水量及其对应的GDP数据绘制了水资源利用效率频谱曲线,揭示了我国区域水资源利用效率的演变趋势。水资源利用效率频谱分析方法通过解析水资源利用效率及其对应的概率密度分布,揭示了区域内部用水效率的不均衡性,可为水资源管理和高效利用精准调控提供科学基础。

关 键 词:水资源高效利用;水资源利用效率频谱;万元GDP用水量;精准调控;节水

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)06-0132-07

随着人口的快速增长和社会经济的迅速发展,水资源短缺成为全球面临的关键性挑战之一,同时由于气候变化与人类活动的影响,旱涝灾害频发,对水资源的安全保障及水资源的可持续利用提出了新的挑战^[1-5]。在缺水性国家或地区,水资源高效利用是缓解水资源供需矛盾的关键举措。2016年10月我国国家发改委、水利部、住建部等八部委联合印发了《全民节水行动计划》^[6],明确提出“在农业、工业、服务业等各领域,城镇、乡村、社区、家庭等各层面,生产、生活、消费等各环节,动员全社会开展节水行动,以高效的水资源利用支撑经济社会可持续发展”。

科学评价水资源利用效率是水资源高效利用亟需解决的基础科学问题。我国水资源利用效率的研究始于2006年,多采用数据包络分析方法(DEA模型)、SBM模型、层次分析法、模糊综合评价法、灰色聚类评价法和投影寻踪法等方法对农业、工业或某一地区的用水效率进行评价,其中,对农业和工业用水效率评价的研究占比较高,这与我国农业水资源利用效率不高、工业用水效率提高空间较大的实际情况相符。如孙付华等^[7]基于DEA-Malmquist指数测算了我国31省(区、市)2011—2015年农水利用效率;朱燕飞等^[8]采用改进的层次分析法和数据包络分析方法,从农业、工业、生活、生态和社会等几个方面选取指标对金华市水资源利用效率进行分析和评价;崔东文^[9]提出SLC-PP水资源利用效率评价模型,以文山州2006—2015年水资源利用效率评价为例进行实例分析;王震等^[10]采用DEA(数据包络分析)交叉评价模型研究了我国13个粮食主产区2001—2011年农业水资源利用效率;高雄等^[11]首先以单一评价方法中常用的熵值法、均方差法、离差法对全国水资源利用效率进行评价,当不同评价方法对同一评价对象得到的结果不一致时,使用平

收稿日期:2019-10-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401401);国家自然科学基金资助项目(51739011,51979285)

作者简介:刘家宏(1977—),男,湖北钟祥人,教授级高级工程师,博士,主要从事城市水文研究。E-mail: liujh@iwhr.com

均值法、Boarda 法、CompeIand 法以及模糊 Boarda 法 4 种组合评价方法对单一评价结果进行组合,同时反复组合评价,直至通过检验;温笑寒等^[12]采用层次分析法、模糊综合评价法、灰色聚类评价法、投影寻踪法等 4 种评价方法对水资源利用效率进行了全面分析。学者们针对水资源利用效率已经进行了大量的相关研究,然而,虽然数据包络分析的评价结果与量纲选取无关,但评价结果只能说明研究区域或行业水资源利用效率的相对高低,还需要结合其他方法找出提高效率的对策;层次分析方法虽能够将多目标多准则的系统和排序优选法应用于分析和评价方案的过程中,但具有一定的主观性缺陷;这些已有研究在反映区域内部用水效率的不均衡性方面还有所欠缺,难以表达不同用水效率水平所支撑的经济体量以及所对应的社会经济发展水平,因此不能有效识别那些低效用水对象,难以实现对低效用水对象进行精准调控。

本文采用水资源利用效率频谱分析方法,基于伽玛函数解析不同用水效率及其对应的经济规模,进而计算不同用水效率对应的经济体量占经济总量的比例,绘制水资源利用效率频谱图。在此基础上,揭示我国区域水资源利用效率的演变趋势以及区域内部用水效率的不均衡性,以期为水资源管理和高效利用精准调控提供理论支撑。

1 研究数据

本研究基于《中国水资源公报》及《中国统计年鉴》上提供的各省份用水指标数据和 GDP 数据进行分析,统计了 1998—2016 年全国 31 个省份的万元 GDP 用水量和全国 GDP 体量。全国平均万元 GDP 用水量及 GDP 体量变化趋势如图 1 所示。总体而言,近 19 年来,随着 GDP 体量的增加,我国的单位 GDP 的用水量呈现不断下降的趋势,水资源利用效率呈现出不断提高的趋势。这种变化趋势一方面得益于用水结构及产业结构的长期调整,实现了由量变到质变的转化;另一方面 2012 年我国开始实行最严格水资源管理制度,用水效率控制制度、水资源管理责任和考核制度逐步建立,提升了用水效率^[13-14]。

2 研究方法

为解析水资源利用效率频谱,本研究采用伽玛函数(Gamma 函数)进行分析。Gamma 曲线最初用于数字图像处理,当 Gamma 值等于 1 的时候,曲线为与坐标轴成 45° 的直线,此时表示输入和输出密度相同。高于 1 的 Gamma 值将会造成输出亮化,低于 1 的 Gamma 值将会造成输出暗化。后来 Gamma 曲线也用于水文统计中,如水文频率的统计分析等,Gamma 分布具有的优势是只有正值,不足之处在于累积的分布功能不能在坐标系统使用直线。Gamma 函数作为阶乘的延拓,是定义在复数范围内的亚纯函数,通常写成 $\Gamma(x)$,实数域上伽马函数可以表示为:

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (1)$$

复数域上伽马函数可以表示为:

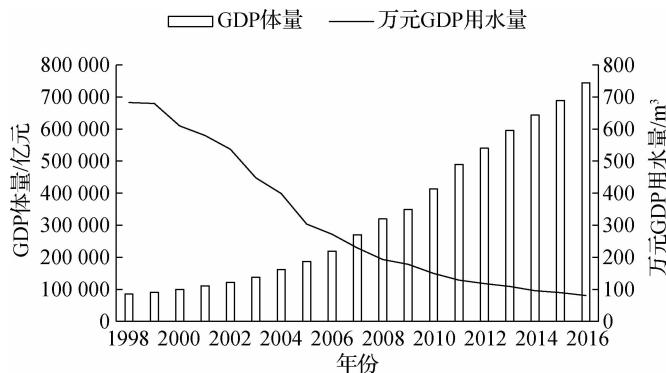


图 1 全国 GDP 体量及平均万元 GDP 用水量变化

Fig. 1 Changes of total amount of GDP and water consumption of average ten thousand yuan GDP in China

$$\Gamma(z) = \int_0^{+\infty} t^{z-1} \exp(-t) dt \quad (2)$$

水文学上用得最多的是著名的皮尔逊概率分布函数簇,而其中最重要一员是 P-III 型分布,其本质上就是三参数的伽马分布^[15-16],也就是多了 1 个位置参数的伽马分布,其密度函数如下:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^\alpha (x - x_0)^{\alpha-1} \exp(-\lambda(x - x_0))}{\Gamma(\alpha)}, & x \geq x_0 \\ 0, & x < x_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_0 为位置参数,保留对基准点或基准时刻的预示; α 为形状线束,以保持与伽马分布的一致; λ 为尺度参数,以保持与指数分布的一致性。其中,当 $\alpha = 1$ 且 $x_0 = 0$ 时对应的分布正好是参数为 λ 的指数分布;当 $\alpha < 1$ 时为递减函数;当 $\alpha > 1$ 时为单峰函数,可以反映经济和技术驱动下水资源利用效率的先锋和群聚特征。因此,本研究选择伽马分布函数作为水资源利用效率频谱分析的基础函数。

本研究基于 1998—2016 年全国各省的万元 GDP 用水量(W_i)和对应的 GDP 量(P_i)数据,按 W_i 的升序编排数组(W_1, P_1),(W_2, P_2),…,(W_{31}, P_{31});在每一个年份内以一定的用水效率步长(ΔW)进行分段,对数组(W_i, P_i)进行分类,具体如下:第 1 组: $\forall (W_{k1}, P_{k1})$, 其中 $W_{k1} \in [0, \Delta W]$, 第 2 组: $\forall (W_{k2}, P_{k2})$, 其中 $W_{k2} \in [\Delta W, 2\Delta W]$, ……, 第 n 组: $\forall (W_{kn}, P_{kn})$, 其中 $W_{kn} \in [\Delta W, n\Delta W]$ 。

按照上述分组方法,将所有省份的数据组无一遗漏地分配到相应的区间,然后对各区间的 GDP 累加起来除以当年的 GDP 总量 $\sum P$,得到各区间的 GDP 占总 GDP 的比例 p_1, p_2, \dots, p_n 。根据前面的定义和计算过程,很容易得到: $\sum_{j=1}^n p_j = 1$, p_1, p_2, \dots, p_n 满足全域上所有区间概率之和为 1 的性质,因此可视作区间概率密度。将 p_1, p_2, \dots, p_n 以柱状图的形式绘制在坐标轴上,并用伽马分布函数去拟合这些数据点,得到的曲线称之为水资源利用效率频谱曲线。由于有些国家或地区的水资源效率分布会出现双峰或多峰特征,这时就要根据具体情况采用两个或多个伽马分布函数的线性组合进行拟合,拟合得到的两个或多个伽马分布函数实际上反映了水资源利用效率内部的不均匀性,以及相应的聚合特征。

本文研究中,取 $\Delta W = 20 \text{ m}^3/\text{万元}$ 进行分段,将各区间对应省份的 GDP 进行统计,对 Gamma 曲线的 3 个参数进行调参拟合,Gamma 曲线以下的面积积分代表当年的经济总量,Gamma 曲线的形状和峰值对应的万元 GDP 用水区间反映水资源利用效率的聚合程度和演变趋势。

3 结果分析

基于上述方法和数据,绘制了中国大陆地区 1998—2016 年水资源利用效率频谱曲线簇(图 2)。结合 Gamma 曲线所反映的物理机制,可以量化分析我国水资源利用效率的时空演变规律。

3.1 水资源利用效率频谱特征分析

由图 2 可知,水资源利用效率总体随着时间的推移和社会经济高速发展而提升,通过考察我国用水量的数据发现,我国用水总量随着 GDP 的增长呈现先上升后下降的波峰起伏变化,说明后期水资源效率提升带来的节水效应已经超过了经济发展对水资源的增量需求,虽然经济总量还在增加,但用水总量出现了回落。水资源的效率频

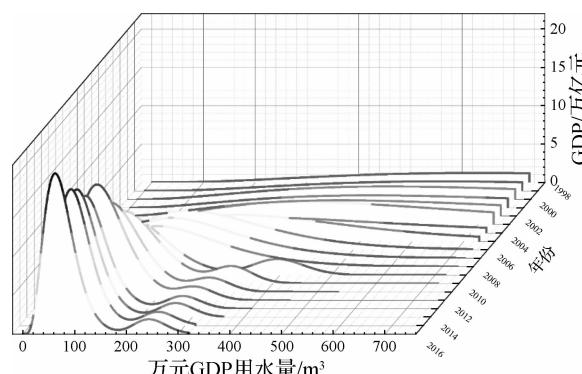


图 2 1998—2016 年水资源利用效率频谱曲线簇

Fig. 2 Frequency spectrum curve cluster of water resources utilization efficiency from 1998 to 2016

谱曲线从1998—2008年基本为单峰变化,2009—2016年出现了尾部的小波峰,呈现双峰形制,随着时间的增长双峰变化的趋势愈加明显,说明水资源利用效率的提升速度出现了两极分化,部分省区继续“领跑”,部分省区水资源利用效率的提升速度出现了“掉队”现象。若采用同样的坐标轴范围,绘制典型年份的水资源利用效率拼图,则会发现1998—2008年曲线扁长,而近几年峰高曲线变得尖窄,并向横坐标轴左端逐渐推移,可知我国的水资源利用效率整体在由低节水水平向高节水水平移动。

本研究将水资源利用效率频谱分为4个阶段进行分析:1998—2002年、2003—2007年、2008—2012年和2013—2016年,前两个阶段总体水资源利用效率较低,提高较慢,水资源浪费严重,后两个阶段水资源利用效率提升较为明显。然而,因我国不同地区间政策、经济和资源配置等相差较大,东南沿海发达地区与西北内陆地区存在很大差异,北京、天津、上海、江苏、广东等地的水资源利用效率在每个阶段都相对较高,而山西、西藏、云南、贵州等地的水资源利用效率在每个阶段都较低,因此中国各省市水资源利用效率和经济地理空间分布存在隐含联系。

另外,由2000—2016年平均万元GDP用水量空间分布(图3)可以看出,中国各省市的水资源利用效率在空间分布上具有明显的正自相关关系,中国各省市区的水资源利用效率的空间分布并非表现出完全随机状态,而是表现出相似值之间的空间集聚性,即具有较高的水资源利用效率的地区相互集聚,而具有较低的水资源利用效率地区相邻。因此,在进行中国水资源利用效率的研究中不能忽略水资源利用效率所客观存在的经济、地理空间分布因素和内部的不均衡性。

3.2 京津冀地区水资源利用效率变化

京津冀地区包括北京市、天津市以及河北省的保定、唐山、廊坊、石家庄、邯郸等11个地级市。2014年习近平总书记提出,实现京津冀协同发展,是重大国家战略。然而,京津冀地区的社会经济发展水平、水资源禀赋及开发利用状况,目前都不太均衡,有必要对京津冀水资源利用效率的发展情势进行进一步分析(见图4),从而为未来促进区域水资源高效利用精准调控和节水战略的实施提供理论和技术支撑。

由1998—2016年水资源利用效率频谱的分析可知,京津冀地区总体而言随着时间的增长其水资源利用效率在增高(图5)。其中,从经济体量而言,京津冀地区的GDP近年来增加明显,万元GDP用水量近年减少显著,这二者之间呈负相关的趋势变化。在2009年之前,北京市的万元GDP用水量在3个地区中总体最低,其次分别为天津市、河北省,而在2009年之后天津市的万元GDP用水量下降比较迅速,随后几年,天津市水资源利用效率在京津冀地区都是最高的,反映了天津市节水水平的快速提升。京津冀地区在2006年以后万元GDP用水量变化趋势减缓,呈现缓慢下降态势,说明随着社会经济的发展水资源利用效率逐渐提高,并逐渐趋稳。从1998—2016年京津冀地区水资源利用效率提升的主要原因有3方面:(1)京津冀地区公共供水管网漏损率得到有效控制;(2)节水高效现代农业、低耗水高新技术产业得到了发展;(3)具备使用再生水条件但未充分利用的钢铁、火电、化工、制浆造纸、印染等高耗水项目的工业用水重复利用率得到了有效提高^[17],部分高耗水产业转移出京津冀地区。

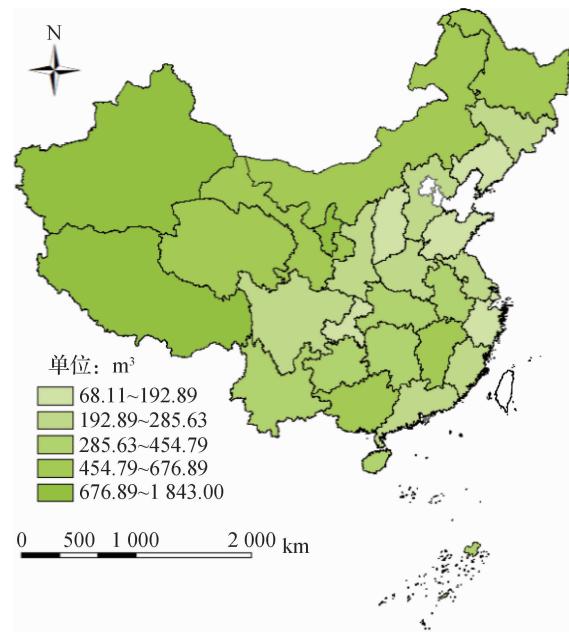


图3 2000—2016年平均万元GDP用水量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of average ten thousand yuan GDP water consumption in 2000—2016

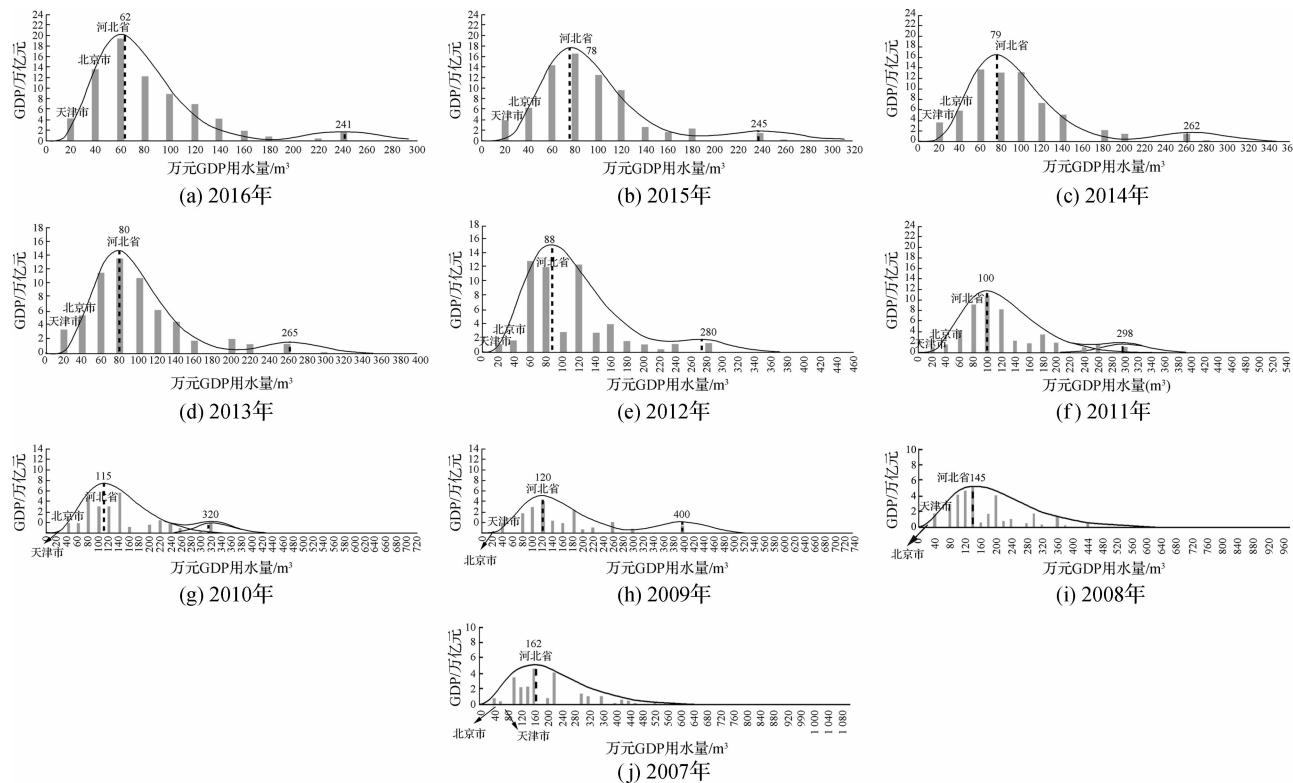


图4 京津冀地区水资源利用效率在频谱图中分布

Fig. 4 Distribution of water resources utilization efficiency in the spectrum of Beijing-Tianjin-Hebei region

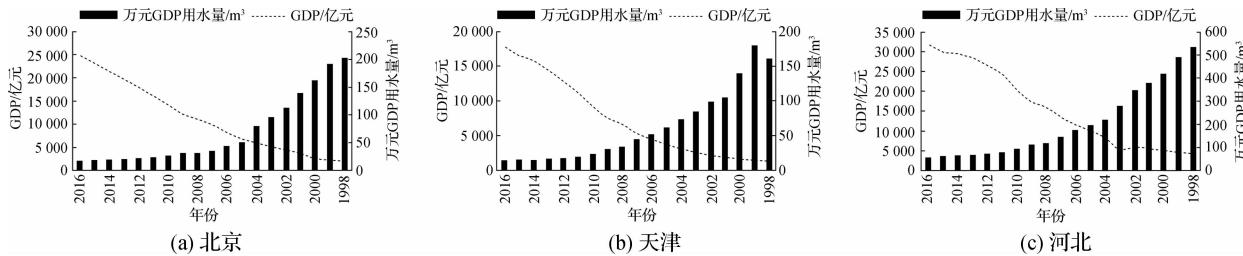


图5 京津冀地区万元GDP用水量变化

Fig. 5 Change of water consumption of ten thousand yuan GDP in Beijing-Tianjin-Hebei region

3.3 水资源高效利用精准调控建议

基于1998—2016年水资源利用效率分析可得,近20年来,我国的水资源利用效率有了很大提升,但就全国而言,在高效合理用水方面,我国与发达国家的节水水平仍存在一定的差距。通过水资源效率频谱分析得知,近年来我国水资源效率提升的速度出现了两极分化的趋势,部分省区水资源效率提升速度较低,出现了“掉队”现象,需要认真调研分析造成这一现象的原因,制定有利于节水和水资源高效利用的政策机制,对重点地区进行精准调控,促进这些“掉队”的地区,尤其是节水潜力较大的地区尽快提升水资源利用效率,落实国家节水行动计划。

4 结语

采用水资源利用效率频谱分析方法,克服了传统水资源效率不能反映区域内部用水效率的不均衡性、无法识别低效用水对象,难以对低效用水对象进行精准调控等不足的问题。通过绘制我国1998—2016年水

资源利用效率频谱可知,我国水资源利用效率总体随着经济社会的发展、技术水平的提高而逐年提高,但近年来水资源利用效率的提升速度出现了明显的两极分化现象,水资源效率频谱呈现出“双峰”特征。总体而言,我国各地区的水资源利用效率与空间分布呈显著的关联性,其中京津冀地区的水资源利用效率在空间分布上也并不是单纯无序的状态,其相似值之间存在着空间集聚,即水资源利用效率具有相似程度的地区相邻。这种分布规律反映出当前水资源利用效率水平的不均衡、不充分问题还比较突出,未来水资源管理的重点是针对“低效”、“掉队”的地区进行精准调控,根据地区特点制定相应的政策机制,使位于效率频谱尾端的省区快速提升水资源利用效率,落实国家节水行动计划。

参 考 文 献:

- [1] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等.水资源风险分析理论及评估方法[J].水利学报,2019,50(8):980-989. (WANG Hongrui, QIAN Longxia, ZHAO Ziyang, et al. Theory and assessment method of water resources risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 980-989. (in Chinese))
- [2] 夏军,石卫.变化环境下中国水安全问题研究与展望[J].水利学报,2016,47(3):292-301. (XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 292-301. (in Chinese))
- [3] 冯保清.我国不同尺度灌溉用水效率评价与管理研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2013. (FENG Baoqing. Study on the evaluation and management of irrigation water use efficiency for different scales in countrywide[D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2013. (in Chinese))
- [4] 王浩,刘家宏.引汉济渭工程在国家水资源战略布局中的作用[J].中国水利,2015(14):47-50,59. (WANG Hao, LIU Jiahong. Hanjiang-to-Weihe River Water Diversion Project plays an important role in China strategy of water resources[J]. China Water Resources, 2015(14): 47-50, 59. (in Chinese))
- [5] 胡四一.《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》出台背景和主要内容答记者问[EB/OL].[2019-09-10].
http://www.china.com/zhibo/2012-02/16/content_24625548.htm. (HU Siyi. The background and main contents of Opinions of the State Council on Implementing the Strictest Water Resources Management System[EB/OL].[2019-09-10]. http://www.china.com/zhibo/2012-02/16/content_24625548.htm. (in Chinese))
- [6] 国家发展改革委,水利部,住房城乡建设部,等.全民节水行动计划[EB/OL].(2016-11-02)[2019-09-10].
<http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n4509650/c5335420/content.html>. (National Development and Reform Commission, Ministry of Water Resources, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, et al. Action plan on water conservation for all[EB/OL]. (2016-11-02)[2019-09-10]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n4509650/c5335420/content.html>. (in Chinese))
- [7] 孙付华,陈汝佳,张兆方.基于三阶段DEA-Malmquist区域农业水资源利用效率评价[J].水利经济,2019,37(2):53-58,78. (SUN Fuhua, CHEN Rujia, ZHANG Zhaofang. Evaluation of utilization efficiency of regional agricultural water resources based on three-stage DEA-Malmquist model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(2): 53-58, 78. (in Chinese))
- [8] 朱燕飞,陈智和,金远征.金华市水资源利用效率评价研究[J].人民长江,2016,47(21):43-47. (ZHU Yanfei, CHEN Zhihe, JIN Yuanzheng. Evaluation on utilization efficiency of water resources in Jinhua City[J]. Yangtze River, 2016, 47(21): 43-47. (in Chinese))
- [9] 崔东文.文山州近10年水资源利用效率评价SLC-PP模型及应用[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):129-136. (CUI Dongwen. SLC-PP model and its application to evaluation of water use efficiency in Wenshan Prefecture in last ten years[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(2): 129-136. (in Chinese))
- [10] 王震,吴颖超,张娜娜,等.我国粮食主产区农业水资源利用效率评价[J].水土保持通报,2015,35(2):292-296. (WANG Zhen, WU Yingchao, ZHANG Nana, et al. Evaluation on agricultural water utilization efficiency in major grain producing areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 292-296. (in Chinese))
- [11] 高雄,王红瑞,高媛媛,等.基于迭代修正的水资源利用效率评价模型及其应用[J].水利学报,2013,44(4):478-488. (GAO Xiong, WANG Hongrui, GAO Yuanyuan, et al. A model based on iteration-correction for water resources utilization efficiency evaluation and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (4): 478-488. (in Chinese))

- [12] 温笑寒. 水资源利用效率评价方法及发展方向探讨[J]. 地下水, 2017, 39(3): 116-117. (WEN Xiaohan. Discussion on evaluation method and development direction of water resources utilization efficiency[J]. Ground Water, 2017, 39(3): 116-117. (in Chinese))
- [13] 苏茂林. 黄河水资源管理制度建设与流域经济社会的可持续发展[J]. 人民黄河, 2015, 37(11): 1-3, 7. (SU Maolin. Water resources management system construction and sustainable socioeconomic development of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2015, 37(11): 1-3, 7. (in Chinese))
- [14] 张国玉, 谢晨, 李舒, 等. 2000 年以来我国用水效率指标变化趋势研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(10): 36-39, 60. (ZHANG Guoyu, XIE Chen, LI Shu, et al. Study on water use efficiency indicators variation trend in China since 2000[J]. Yellow River, 2018, 40(10): 36-39, 60. (in Chinese))
- [15] 陆国锋. 常熟市暴雨强度公式编制及应用研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016. (LU Guofeng. The establishment and application of rainstorm intensity formula in Changshu City[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016. (in Chinese))
- [16] 龚谊承. 基于频率类别的洪水过程模拟和广义洪水风险分析与模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2012. (GONG Yicheng. A flood simulation based on the types of flood frequencies and the generalized flood risk analyses with their simulations[J]. Wuhan: Wuhan University, 2012. (in Chinese))
- [17] 唐忠辉. 关于国家节水新政的分析与建议[J]. 中国水利, 2015(19): 9-12. (TANG Zhonghui. Analysis and suggestion of national new policy on water-saving[J]. China Water Resources, 2015(19): 9-12. (in Chinese))

Spectrum analysis method for assessing water use efficiency

LIU Jiahong¹, SHAO Weiwei¹, WANG Hao¹, LI Yuanfei², LI Weijia³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Geographic Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 110629, China; 3. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Efficient utilization of water resources is one of the key measures to alleviate the contradiction between supply and demand of water resources in the water-deficient areas. Therefore, how to evaluate the utilization efficiency of water resources in a country or a region is a basic scientific problem to be solved in water resources management. Existing water resources utilization efficiency evaluation indicators mainly include water consumption per ten-thousand-yuan GDP, agricultural irrigation water utilization coefficient and so on. However, these indicators represent the comprehensive water use level of a country or a region. They cannot reflect the imbalance of water use efficiency within the region, nor can they express the economic volume supported by different water use efficiency levels. Therefore, they cannot identify low-efficiency water users and it is difficult to make precise regulation for the low-efficiency water users. This paper presents a spectrum analysis method for water resources utilization efficiency. Based on the Gamma function, this study analyzes the different water use efficiency and its corresponding economic scale, and then calculates the proportion of the economic volume corresponding to different water use efficiency to the total economic volume (as the probability density) and draws the spectrum curves of water use efficiency. Using this method, the research on the spectrum of water resources utilization efficiency in China is carried out. Based on the water consumption per ten-thousand-yuan GDP in different provinces and corresponding GDP data from 1998 to 2016, the spectrum curves of water resources utilization efficiency are drawn, and the evolution trend of regional water resources utilization efficiency in China is revealed. The spectrum analysis method of water use efficiency reflects the imbalance of water use efficiency within the region by analyzing the distribution of water use efficiency and its corresponding probability density, which can provide a scientific basis for water resources management and precise regulation of efficient utilization.

Key words: efficient utilization of water resources; spectrum analysis method for assessing water use efficiency; water consumption per ten-thousand-yuan GDP; water demand regulation; water saving